بررسی عملکرد پانل میانی نازک بین دو بازشو در دیوارهای برشی فولادی با سخت‌کننده*

سعید صبوری(۱)　الناز آهوری(۲)　صلاح‌الدین مام عزیزی(۳)

چکیده *در دیوارهای برشی فولادی دارای دو بازشو، پانل بین بازشوها به لحاظ عملکرد با یک تیر شبیه‌سازی می‌شود که بسته به نسبت ابعاد، رفتاری به صورت برشی یا خمشی صرف و یا به صورت رفتار برشی و خمشی توأم خواهد داشت. با فرض در نظر گرفتن سخت‌کننده‌های دوگانه در طرفین پانل میانی، سخت‌کننده‌های مذکور همانند ستون‌های پانل بین بازشوها، که خود قابل مقایسه با یک سیستم دیوار برشی فولادی می‌باشد، رفتار می‌کنند. برای اطمینان از وقوع جاری شدن برشی ورق فولادی پانل میانی پیش از جاری شدن سخت‌کننده‌های طرفین آن در اثر خمش، لازم است سطح مقطع سخت‌کننده‌های مذکور از حد معینی کم‌تر نباشد. از طرفی در تعیین رفتار پانل میانی به لحاظ رفتار خمشی یا برشی، نسبت ابعاد آن تأثیرگذار می‌باشد. در این مقاله، پانل میانی با شبیه‌سازی به یک تیر مورد مطالعه قرار گرفته و روابطی برای تعیین حدود ابعاد پانل میانی نازک و برای محاسبه‌ی حداقل سطح مقطع مورد نیاز برای سخت‌کننده‌های طرفین پانل مذکور، ارائه شده است. هم‌چنین نتایج حاصل از روابط به‌دست آمده با نتایج مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS مقایسه شده است. بر این اساس مشخص شده است که در مورد دیوارهای برشی فولادی تقویت‌شده دارای دو بازشو، می‌توان با انتخاب نسبت مناسب ارتفاع به عرض پانل میانی، از عملکرد برشی در پانل بین بازشوها اطمینان داشت.*

واژه‌های کلیدی دیوارهای برشی فولادی، بازشوهای مستطیلی، پانل میانی نازک، سخت‌کننده.

Study of Unstiffened Central Panel between Two Openings in Steel Plate Shear Walls with Stiffeners

S. Sabouri　E. Ahouri　S. Mamazizi

Abstract *The central panel in steel plate shear walls (SPSWs) with two openings is considered as an I-shaped beam extending the height of the opening. Based on its "height to width" ratio, the dominant behavior can be due to shear or flexure or a combination of the two. The double stiffeners on the vertical sides of the central panel act as columns, comparable to columns of a typical SPSW system. Care is taken to keep the sectional area of the stiffeners above a minimum specified value in order to ensure that shear yielding of the central panel's plate precedes flexural yielding of the stiffeners. The leading dimensions of central panel directly govern the behavior of the panel in shear and flexure. In this paper, central panel has been modeled as an I-shaped beam and equations have been derived for panel aspect ratio and cross sectional area of double stiffeners for different modes of behavior. Theoretical results are then compared with results of finite element analysis using ABAQUS Finite Element software. Based on this comparison, it can be concluded that in SPSWs with two openings, selection of a reasonable aspect ratio for central panel can cause shear dominant behavior in central panel.*

Key Words Steel Plate Shear Wall, Rectangular Openings, Unstiffened Central Panel, Stiffener.

★ تاریخ تصویب مقاله ۸۹/۰۹/۰۶ و تاریخ دریافت نسخه نهایی اصلاح شده ۹۱/۳/۳

(۱) نویسنده‌ی مسؤول، استاد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

(۲) کارشناس ارشد سازه، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

(۳) دانشجوی دکتری سازه، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

مقدمه

دیوارهای برشی فولادی به صورت تقویت‌شده و بدون تقویت، هم‌چنین در حالت وجود بازشو و یا عدم وجود آن، طراحی و ساخته می‌شوند. دیوارهای برشی فولادی دارای مزایای متعدد و ممتازی نسبت به سایر سیستم‌های باربر جانبی می‌باشند و از این رو در سال‌های اخیر توسط محققان مختلفی مانند آستانه اصل [1-3]، کولاک [6-4]، درایور [4,6]، توربرن [5]، برونو [10-7]، برمن [8]، پارک [11,12] مورد مطالعه قرار داده شده‌اند.

استفاده از دیوارهای برشی ساخته شده از ورق‌های فولادی دارای مزایای زیادی از جمله شکل‌پذیری بالا و قابلیت جذب انرژی زیاد، سهولت اجرایی، سختی اولیه بالا، وزن کم‌تر در مقایسه با نمونه‌های بتنی مشابه می‌باشد.

از نخستین مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده بر روی نمونه‌های دیوارهای برشی فولادی دارای بازشو، تحقیقات صورت‌گرفته در آزمایشگاه سازه‌ی دانشگاه کاردیف انگلستان می‌باشد [18-۱۳]. در این مطالعات، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها با اعمال بارگذاری چرخه‌ای شبه‌استاتیکی بر روی نمونه‌های دیوارهای برشی فولادی بدون تقویت و دارای یک بازشوی دایروی موجود در مرکز ورق انجام گرفت و مشاهده شد که نمونه‌ها دارای شکل‌پذیری کافی و حلقه‌های هیسترزیس پایدار S شکل بوده و قابلیت جذب انرژی آن‌ها در هر چرخه‌ی بارگذاری، با حداکثر دامنه‌ی تغییرشکل برشی افزایش داشته و مشخص شد که مقاومت و سختی پانل‌ها با افزایش قطر بازشو کاهش پیدا کرده است.

در سال ۲۰۰٤ یک نمونه دیوار برشی فولادی با ورق نازک دارای بیست سوراخ دایره‌ای و نمونه‌ی دیگر دارای بازشویی به شکل ربع دایره در گوشه‌ی ورق، با استفاده از ورق فولادی با مقاومت جاری شدن پایین (Low Yield Point Steel) در آزمایشگاه سازه‌ی مرکز ملی تحقیقات مهندسی زلزله (NCREE) در دانشگاه ملی تایوان (NTU) مورد آزمایش قرار گرفت [10].

بر اساس نتایج این آزمایش‌ها، مشخص شد که فولاد دارای مقاومت جاری شدن پایین می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی به منظور کاربرد در ساخت المان‌های جاذب انرژی در سیستم‌های باربر جانبی محسوب شود. در همه‌ی نمونه‌های مورد آزمایش بازشودار، کاهش سختی و مقاومت، نسبت به نمونه‌های مشابه فاقد بازشو مشاهده شد. در نمونه مشبک، جاری شدن ورق در فواصل باریک بین بازشوها آغاز شد و در این نواحی گسترش پیدا کرد. نمونه‌ی مذکور در ابتدای آزمایش عملکرد بسیار خوبی به نمایش گذاشت. این نمونه در محدوده‌ی تغییر مکان‌های کوچک رفتار الاستیک داشت و در محدوده‌ی غیر الاستیک، رفتار هیسترتیک پایداری ارائه نمود. نمونه‌ی دارای بازشوی ربع دایره در گوشه‌ی ورق، تا دریفت برابر با ۲/۵٪، رفتار هیسترتیک پایداری در ضمن اعمال چرخه‌های بارگذاری نشان داد.

در سال ۲۰۰۸، چهار نمونه دیوار برشی فولادی تقویت‌شده با بازشوی مستطیل شکل مرکزی که در آن‌ها از ورق فولادی نرم [14]، استفاده شده بود، در آزمایشگاه سازه‌ی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن مورد آزمایش قرار گرفت [۲۰]. پس از آن نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از بررسی‌های عددی تطبیق داده شد. نتایج هر دو روش که دارای انطباق بسیار خوبی بودند، نشان‌دهنده‌ی کاهش سختی و مقاومت نمونه‌های دارای بازشو با افزایش عرض بازشو، نسبت به نمونه‌های مشابه فاقد بازشو بود و مشخص شد که تقویت ورق می‌تواند اثر کاهش سختی و مقاومت را در نمونه‌های تقویت‌شده تا حدود ٤۰٪ جبران نماید.

در این مقاله، پانل میانی نازک بین دو بازشو (فاقد سخت‌کننده برای تقویت ورق جان پانل مذکور) در دیوارهای برشی فولادی مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف از این تحقیق شامل موارد زیر می‌باشد:

(۱) مطالعه‌ی تئوریک پانل میانی بین دو بازشو، با شبیه‌سازی آن به تیر با مقطع I شکل.

(۲) ارائه‌ی روابطی برای محاسبه حدود ابعاد پانل میانی به منظور تعیین نوع عملکرد آن.

(۳) ارائه‌ی روابطی برای محاسبه حداقل سطح مقطع مورد نیاز برای سخت‌کننده‌های طرفین پانل میانی با هدف جلوگیری از ایجاد تغییرشکلهای خارج از صفحه‌ی قابل ملاحظه در پانل مذکور.

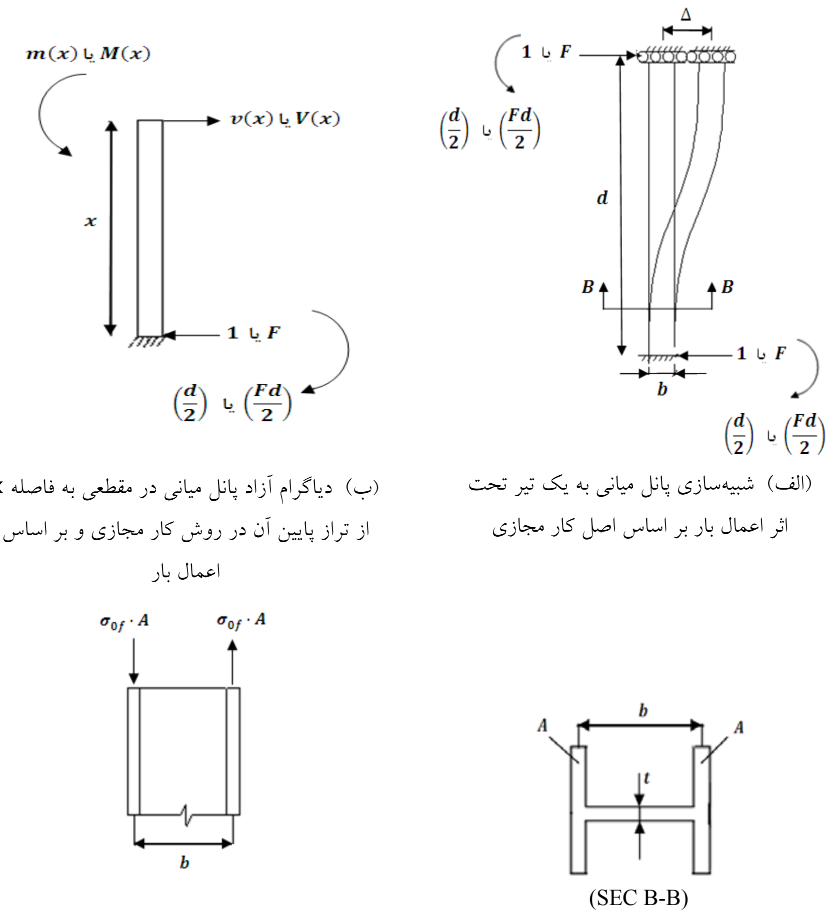
بررسی و مطالعه‌ی رفتار پانل میانی در نمونه‌های دارای دو بازشو و عوامل مؤثر بر عملکرد آن

در سیستم دیوار برشی فولادی دارای دو بازشوی مستطیلی ایستاده، پانل بین بازشوها (پانل میانی) مشابه یک دیوار برشی فولادی با ابعاد کم‌تر از ابعاد پانل اصلی است که نسبت ارتفاع به عرض پانل مذکور در تعیین رفتار آن تأثیرگذار است. به نحوی که رفتار المان، بر حسب نسبت ارتفاع به عرض آن، به صورت رفتار غالباً برشی، غالباً خمشی و یا ترکیبی از رفتارهای برشی و خمشی دسته‌بندی می‌گردد.

در دیوارهای برشی فولادی با افزایش قابل ملاحظه‌ی عرض نسبت به ارتفاع نمونه، عملکرد دیوار به سمت عملکرد برشی میل می‌کند و رفتار نمونه بهبود می‌یابد. بر اساس تئوری اندر کنش ورق فولادی- قاب (Plate-Frame Interaction) [15و۱۳] تغییر مکان برشی حد الاستیک ورق فولادی، U_{we}، با ارتفاع ورق نسبت مستقیم دارد و تقریباً مستقل از عرض و ضخامت آن می‌باشد. در حالی که مقاومت برشی نهایی نمونه، F_{wu}، مستقل از ارتفاع ورق است با عرض و ضخامت ورق متناسب می‌باشد؛ لذا با افزایش عرض دیوار، تغییر مکان برشی حد الاستیک ورق تقریباً ثابت می‌ماند و مقاومت برشی نهایی آن افزایش می‌یابد و طبق رابطه $K = \frac{F}{U}$، با ثابت ماندن U و افزایش F، سختی برشی نمونه افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این، با افزایش قابل توجه نسبت عرض به ارتفاع نمونه، میدان کششی ورق عمدتاً بین تیرهای طبقات تشکیل شده و شدت تأثیر منفی آن بر ستون‌ها کاهش می‌یابد. لذا در سیستم دیوارهای برشی فولادی، عملکرد برشی بر رفتار خمشی ترجیح داده می‌شود.

در مورد نمونه‌ی پانل یک طبقه و یک دهانه‌ی مورد بررسی در این تحقیق، با مشخصات ذکرشده در بخش مدل‌سازی و صحت سنجی نمونه‌ها، عملکرد برشی در حد بسیار بالایی حاکم است و خمش قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

در ارتباط با پانل میانی بین بازشوها، تمایل به حاکم شدن عملکرد برشی بر رفتار خمشی، مبنای استخراج رابطه‌ی تعیین حدود نسبت ارتفاع به عرض پانل در نظر گرفته شده است. بر طبق این اصل، لازم است وقوع جاری شدن برشی ورق جان پانل مذکور، پیش از جاری شدن سخت‌کننده‌های دوگانه‌ی طرفین آن در اثر خمش حاصل از عملکرد نیروهای کششی و فشاری در آن‌ها رخ دهد. از آنجا که سخت‌کننده‌های طرفین پانل میانی، به منزله‌ی ستون‌های پانل بین دو بازشو می‌باشند، باید به لحاظ دارا بودن حداقل سطح مقطع مورد نیاز برای جلوگیری از وقوع کمانش کلی در ورق جان پانل میانی کنترل شده و حداقل مقدار به‌دست آمده را ارضا نمایند. با این وجود، ارضای این رابطه و انتخاب حداقل سطح مقطع مورد نیاز برای سخت‌کننده‌های مذکور، لزوماً برای جلوگیری از انحنای این سخت‌کننده‌ها به طرف داخل، به دلیل تأثیر نیروهای ناشی از میدان کششی قطری ورق، کفایت نمی‌کند.



(الف) شبیه‌سازی پانل میانی به یک تیر تحت اثر اعمال بار بر اساس اصل کار مجازی

(ب) دیاگرام آزاد پانل میانی در مقطعی به فاصله x از تراز پایین آن در روش کار مجازی و بر اساس اعمال بار

(SEC B-B)
(ج) مقطع تیر ارائه‌شده در قسمت (الف)

(د) فرض نیروی محوری در بال‌ها

شکل ۱ پانل میانی بین بازشوها در حالت شبیه‌سازی‌شده به یک تیر با مقطع I شکل

رعایت حداقل مقدار به‌دست آمده برای سطح مقطع سخت‌کننده‌های طرفین پانل میانی، باید به عنوان یکی از شروط لازم طراحی، در نظر گرفته شود. با انتخاب سطح مقطع بیشتر برای سخت‌کننده‌ها، نسبت به حداقل مقدار به‌دست آمده، می‌توان انحنای آن‌ها به سمت داخل پانل را به حداقل رساند.

بررسی عملکرد کمانش پانل میانی و ارائه‌ی روابط تئوری حاکم

در این تحقیق، شرط رعایت حداقل سطح مقطع لازم برای سخت‌کننده‌های طرفین پانل میانی و نیز انتخاب نسبت مناسب ارتفاع به عرض پانل میانی برای تعیین نوع عملکرد آن، در حالتی که پانل مذکور نازک باشد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر این اساس، ورق پانل میانی، بدون سخت‌کننده در نظر گرفته شده است.

برای محاسبه‌ی تغییر مکان‌های برشی و خمشی، از اصل کار مجازی استفاده می‌شود. بر اساس این تئوری، تغییر مکان‌های برشی و خمشی به ترتیب از روابط (۲ و ۱) به‌دست می‌آیند [۱۹]:

$$\Delta_s = K\int_0^d \frac{V(x).v(x)dx}{GA} \qquad (۱)$$

$$\Delta_b = \int_0^d \frac{M(x).m(x)dx}{EI} \qquad (۲)$$

در روابط (۲ و ۱)، Δ_s و Δ_b به ترتیب تغییر مکان‌های برشی و خمشی و $V(x)$ و $M(x)$ نیروی برشی و لنگر خمشی در مقطع المان به ازای اعمال نیروی جانبی F هستند و $v(x)$ و $m(x)$ نیروی برشی و لنگر خمشی در مقطع المان به ازای اعمال نیروی جانبی واحد می‌باشند. K ثابت برش مقطع تعریف می‌شود، G و E ضریب ارتجاعی برشی و خمشی هستند و I و A به ترتیب معرف ممان اینرسی و مساحت مقطع می‌باشند. در این قسمت لازم است تا با شبیه‌سازی پانل میانی دیوار برشی فولادی، به یک تیر با مقطع I شکل، نیروها و تغییر مکان‌های برشی و خمشی در آن، بر اساس اصل فوق تعیین گردند.

شکل (۱- الف) نشان‌دهنده‌ی پانل تغییرشکل‌یافته تحت اثر اعمال بار جانبی موجود F و نیز در حالت اعمال بار جانبی واحد طبق اصل کار مجازی می‌باشد. در شکل (۱- ب) دیاگرام آزاد پانل در مقطعی به فاصله‌ی x از تراز پایین آن در هر دو حالت بارگذاری مذکور و در شکل (۱- ج) مقطع پانل نمایش داده شده است. در شکل (۱- ب)، $V(x)$ و $v(x)$ به ترتیب معرف نیروی برشی در مقطع مورد بررسی به فاصله‌ی x از انتهای المان تحت اثر اعمال بار جانبی F و بار واحد بوده و $M(x)$ و $m(x)$ به ترتیب، ممان‌های خمشی در اثر اعمال بار جانبی F و بار واحد، تعریف می‌شوند. جان تیر در شکل (۱- ج)، ورق جان پانل بین بازشوها است و بال‌های تیر، سخت‌کننده‌های طرفین پانل میانی می‌باشند.

شکل (۱- د) نیز نیروهای محوری به‌وجودآمده در سخت‌کننده‌های دو طرف پانل بین بازشوها را نشان می‌دهد. در شکل (۱)، b، فاصله مرکز تا مرکز سخت‌کننده‌های طرفین پانل، d، ارتفاع پانل و t، ضخامت ورق پانل مذکور در نظر گرفته شده است و A، سطح مقطع سخت‌کننده‌های طرفین پانل می‌باشد. ضریب پواسون نیز با μ معرفی شده است. در روابط مربوط به محاسبه‌ی تغییر مکان‌های برشی و خمشی بر طبق اصل کار مجازی [۱۹]، پس از تعیین ممان‌های خمشی به‌صورت $M(x) = F\cdot(x-0.5d)$ و $m(x) = 1\cdot(x-0.5d)$ و نیروهای برشی به‌صورت $V(x) = F$ و $v(x) = 1$، می‌توان رابطه‌ی (۲) را به‌صورت رابطه‌ی (۳) بازنویسی نمود:

$$\Delta_b = \int_0^d \frac{F\left(x-\frac{d}{2}\right)^2 dx}{EI} = \frac{F}{EI}\int_0^d \left(x^2+\frac{d^2}{4}-d.x\right)dx = \frac{Fd^3}{12EI_f} \qquad (۳)$$

I_f ممان اینرسی سخت‌کننده‌های طرفین پانل مذکور می‌باشد که بر اساس رابطه‌ی (٤) قابل محاسبه است:

$$I_f = 2A\left(\frac{b}{2}\right)^2 = \frac{Ab^2}{2} \qquad (٤)$$

بر اساس روابط (٤ و۳)، Δ_b از رابطه‌ی (۵) محاسبه می‌گردد:

$$\Delta_b = \frac{Fd^3}{6EAb^2} \qquad (۵)$$

برای محاسبه‌ی تغییر مکان برشی، Δ_s، با توجه به این‌که مقطع مورد بررسی، مقطع I شکل است و ضریب شکل برای نیم رخ‌های I شکل مساوی ۱ در نظر گرفته می‌شود [۱۹]، از رابطه‌ی (۱) با فرض $K = 1$، به رابطه‌ی (٦) خواهیم رسید:

$$\Delta_s = \int_0^d \frac{Fdx}{\left(\frac{E}{2(1+\mu)}\right)A_w} = \int_0^d \frac{2F(1+\mu)dx}{EA_w} \rightarrow \Delta_s = \frac{2Fd(1+\mu)}{EA_w} \qquad (٦)$$

A_w در رابطه‌ی (٦)، برابر با مساحت وجه تحت اثر برش (سطح مقطع ورق جان در پانل میانی) تعریف می‌گردد و برابرست با:

$$A_w = bt \qquad (۷)$$

در این صورت، بر اساس معادلات (۷و ٦)، مقدار Δ_s را می‌توان از رابطه‌ی (۸) محاسبه نمود:

$$\Delta_s = \frac{2Fd(1+\mu)}{Ebt} \quad (۸)$$

به عنوان اولین شرط مورد بررسی در این تحقیق، لازم است وقوع جاری شدن برشی ورق جان پانل میانی، پیش از جاری شدن سخت‌کننده‌های دوگانه‌ی طرفین این پانل (بال‌های مقطع I شکل) در اثر خمش رخ دهد. خمش مؤثر بر مقطع پانل میانی، ناشی از ایجاد نیروهای کششی در سخت‌کننده‌های یک سمت آن و نیروهای فشاری در سخت‌کننده‌های سمت دیگر می‌باشد. لازمه‌ی محقق شدن شرط اول، برقرار بودن رابطه‌ی (۹) است:

$$F_{su} \leq F_{bu} \quad (۹)$$

در رابطه‌ی (۹)، F_{su} نیروی برشی نهایی (با فرض الاستیک -کاملاً پلاستیک‌بودن دیاگرام تنش- کرنش فولاد) در ورق جان پانل بین بازشوها و F_{bu} نیروی جانبی ناشی از لنگر خمشی نهایی (با فرض الاستیک - کاملاً پلاستیک بودن دیاگرام تنش- کرنش فولاد) در تراز فوقانی پانل میانی می‌باشد که مطابق شکل (۱-د) منجر به ایجاد نیروی محوری برابر با $\sigma_{0f} \cdot A$ در سخت‌کننده‌های مذکور می‌گردد.

شرط دوم در این تحقیق، مستلزم بیشتر بودن تغییر مکان برشی حد الاستیک ورق، Δ_{su}، از تغییر مکان خمشی حد الاستیک، Δ_{bu}، در تراز فوقانی پانل میانی می‌باشد، که به صورت رابطه‌ی (۱۰) بیان می‌گردد:

$$\Delta_{su} \geq \Delta_{bu} \quad (۱۰)$$

در المان مورد بررسی بر اساس شکل‌های (۱-ج) و (۱-د)، در صورتی که لنگر خمشی در ترازهای بالا و پایین تیر ارائه‌شده را به ترتیب با نمادهای M_T و M_B معرفی کنیم و σ_{0f} تنش جاری شدن فولاد بال‌ها در مقطع (B-B) (سخت‌کننده‌های طرفین پانل میانی) در نظر گرفته شود، می‌توان مقادیر ممان‌های مذکور را بر اساس رابطه‌ی (۱۱) محاسبه نمود:

$$M_B = M_T = \frac{F_{bu} \cdot d}{2} \quad (۱۱)$$

از طرف دیگر بر اساس شکل (۱-د)، ممان‌های M_T و M_B از رابطه‌ی (۱۲) قابل تعیین است:

$$M_B = M_T = \sigma_{0f} \cdot Ab \quad (۱۲)$$

با مساوی قرار دادن طرف راست معادلات (۱۲و۱۱)، مقدار F_{bu} بر اساس معادله‌ی (۱۳) قابل تعیین است:

$$F_{bu} = \frac{2\sigma_{0f}}{d} Ab \quad (۱۳)$$

با توجه به روابط کلاسیک و لاغری بالای ورق پانل میانی، عملاً تنش برشی بحرانی آن، τ_{cr}، ناچیز و نزدیک به صفر می‌باشد. [15 و ۱۳] در صورت قابل توجه بودن مقدار τ_{cr}، می‌بایست مقدار آن در روابط لحاظ شده و روابط جدید استخراج گردد. بنابراین، در مورد پانل نازک بین بازشوها می‌توان نوشت:

$$\tau_{cr} = 0 \quad (۱٤)$$

در این صورت روابط (۱٦و۱۵) در مورد پانل میانی برقرار می‌باشند:

$$F_{su} = F_{wu} = \frac{1}{2}\sigma_{0w} \cdot bt \quad (۱۵)$$

$$\Delta_{su} = U_{we} = \frac{2\sigma_{0w}}{E} \cdot d \quad (۱٦)$$

در روابط فوق، σ_{0w} تنش جاری شدن فولاد ورق می‌باشد. اکنون بر اساس نامساوی (۹) (شرط اول مورد بررسی در این تحقیق) و رابطه‌های (۱۵و۱۳)، رابطه‌ی (۱۷) به دست می‌آید:

$$F_{su} \leq F_{bu} \rightarrow \frac{1}{2}\sigma_{0w} \cdot bt \leq \frac{2\sigma_{0f}}{d} \cdot Ab \rightarrow A \geq \frac{\sigma_{0w} \cdot td}{4\sigma_{0f}} \quad (۱۷)$$

با جایگزین نمودن F_{bu} و F_{su} به ترتیب در روابط (۸ و۵)، می‌توان مقدار Δ_{su} را بر طبق رابطـه‌ی (۱۸) و مقدار Δ_{bu} را از رابطه‌ی (۱۹) تعیین نمود:

$$\Delta_{su}=\frac{2.6dF_{su}}{Ebt} \qquad (۱۸)$$

$$\Delta_{bu}=\frac{F_{bu}\cdot d^3}{6EAb^2} \qquad (۱۹)$$

در صـورتی کـه بـه جـای F_{su} در رابطـه‌ی (۱۸)، عبارت معادل با آن بر اسـاس رابطـه‌ی (۱۵) قـرار داده شود، و به جای F_{bu} در رابطه‌ی (۱۹)، عبارت به دست آمده از رابطه‌ی (۱۳) جایگزین گـردد، نامسـاوی (۱۰) (دومین شرط مورد بررسی در این تحقیق) بـه صـورت نامساوی (۲۰) بازنویسی می‌گردد:

$$\Delta_{su}\geq \Delta_{bu}\rightarrow \frac{2\sigma_{0w}}{E}d \geq \frac{2\sigma_{0f}}{d}\cdot Ab\cdot \frac{d^3}{6EAb^2} \rightarrow \frac{d}{b}<6\frac{\sigma_{0w}}{\sigma_{0f}} \qquad (۲۰)$$

بـا فـرض یکسـان بـودن انـواع فـولاد در ورق و سخت‌کننده‌ها، می‌توان نوشت:

$$\sigma_{0w}=\sigma_{0f}=\sigma_0 \qquad (۲۱)$$

$$\frac{d}{b}<6 \qquad (۲۲)$$

نتیجه‌ی محاسبات فـوق، در جـداول (٤-۱) ارائـه شده است.

جدول ۱ فرضیات اصلی هر دو حالت
استفاده از پانل میانی تقویت‌شده و بدون تقویت

$F_{su}\leq F_{bu}$	شرط اصلی در ارتباط با نیروها
$\Delta_{su}\geq \Delta_{bu}$	شرط اصلی در ارتباط با تغییر مکان‌ها

جدول ۲ روابط مشترک برای هر دو حالت
وجود پانل میانی تقویت‌شده و بدون تقویت

$\Delta_b=\frac{Fd^3}{12EI_f}$	$\Delta_s=\frac{2F(1+\mu)d}{EA_w}$
$\Delta_{bu}=\frac{F_{bu}\cdot d^3}{6EAb^2}$	$\Delta_{su}=\frac{2.6dF_{su}}{Ebt}$
$I_f=\frac{Ab^2}{2}$	$A_w=bt$

بـا قــرار دادن مقــدار F_{bu} از رابطــه‌ی (۱۳) در معادله‌ی (۱۹) خواهیم داشت:

$$\Delta_{bu}=\frac{F_{bu}\cdot d^3}{6EAb^2}=\frac{2\sigma_{0f}\cdot d^2}{6Eb} \qquad (۲۳)$$

لذا با فرض ثابت بودن d، E، μ ، A، t، σ_{0w} و σ_{0f} و تغییر مقدار b که سـبب تغییـر نسـبت d/b در پانـل میانی می‌شود، می‌توان سختی خمشی و سختی برشـی المان مورد مطالعه را محاسبه نمود. با توجه به روابــط (۲۳ و ۱۳)، سختی خمشی پانل از رابطه‌ی (٢٤) تعیین می‌گردد:

$$K_b=\frac{F_{bu}}{\Delta_{bu}}=\frac{6EAb^2}{d^3} \qquad (۲٤)$$

لذا با فرض تغییر عرض پانل و ثابت بـودن سـایر پارامترها، خواهیم داشت:

$$\begin{cases}F_{bu}\propto b\\ \Delta_{bu}\propto \frac{1}{b}\end{cases} \rightarrow K_b=\frac{F_{bu}}{\Delta_{bu}}\propto \frac{b}{\frac{1}{b}}\rightarrow K_b\propto b^2 \qquad (۲٥)$$

بر اساس رابطه‌ی (۲٥) سختی خمشی پانل میـانی با توان دوم عرض پانل مذکور تغییر می‌کنـد. در مـورد پانل میانی بدون تقویت که در آن فرض ایجاد کمـانش برقرار اسـت، بـر اسـاس روابـط (۱٦ و ۱٥)، سـختی برشی از رابطه‌ی (۲٦) تعیین می‌گردد:

$$K_s=\frac{F_{su}}{\Delta_{su}}=\frac{Ebt}{4d} \qquad (۲٦)$$

بنابراین در المان مورد مطالعه می‌توان به رابطـه‌ی (۲۷) برای محاسبه‌ی سختی برشی رسید:

$$\begin{cases}F_{su}\propto b\\ \Delta_{su}\propto 1\end{cases}\rightarrow K_s=\frac{F_{su}}{\Delta_{su}}\propto b\rightarrow K_s\propto b \qquad (۲۷)$$

لذا در صورت مطالعه پانل میانی نازک، بـا فـرض ثابت بودن مقادیر d، E، μ، A، t، σ_{0w} وσ_{0f} و پـذیرفتن b به عنوان تنها پارامتر متغیر، می‌توان بیان کرد:

بر اساس رابطه‌ی (۲۷)، سختی برشی پانل میـانی، K_s، با عرض پانل مـذکور، b، متناسـب اسـت و طبـق رابطه‌ی (۲٥)، سختی خمشی المان، K_b، بـا b^2 نسـبت مسـتقیم دارد. در چنـین شـرایطی، بـا افـزایش b و در

نتیجه با کاهش نسبت d/b، افزایش سختی خمشی المان به مراتب بیشتر از افزایش سختی برشی آن می‌باشد و به دلیل ایجاد سختی برشی کم‌تر نسبت به سختی خمشی، تغییر مکان‌های برشی از تغییر مکان‌های خمشی المان بیشتر شده و رفتار برشی بر عملکرد خمشی حاکم می‌شود. از طرفی با کاهش b و نتیجتاً افزایش نسبت d/b، کاهش سختی خمشی المان به مراتب بیشتر از کاهش سختی برشی آن می‌گردد. در این صورت، به علت ایجاد سختی برشی بیشتر نسبت به سختی خمشی در پانل میانی، تغییر مکان‌های خمشی از تغییر مکان‌های برشی بیشتر می‌شود و رفتار خمشی المان بر عملکرد برشی غالب می‌گردد.

مدل‌سازی و صحت‌سنجی نمونه‌ها با استفاده از آزمایش‌های گذشته

با هدف صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی، از دو نمونه‌ی آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی یک طبقه و یک دهانه‌ی فاقد بازشو، که یکی از آنان دارای سخت‌کننده و دیگری بدون تقویت می‌باشد [۲۰]، استفاده شد و منحنی‌های بار- تغییر مکان جانبی آزمایشگاهی دو نمونه‌ی مذکور تحت اثر بارگذاری مونوتونیک، به عنوان ملاک تعیین صحت نتایج مدل‌سازی عددی، در صورت مقایسه با منحنی‌های متناظر حاصل از مدل‌سازی در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۳ روابط ارائه شده به منظور تعیین کمیت‌های A و d/b در حالت استفاده از پانل میانی بدون تقویت

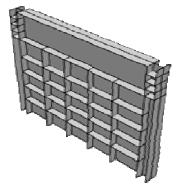
(تعریف)	(رابطه)
فرض اصلی در مورد پانل میانی نازک	$\tau_{cr} = 0$
نیروی برشی نهایی در ورق پانل میانی	$F_{su} = 0.5\sigma_{0w} \cdot bt$
نیروی جانبی نهایی در تراز فوقانی پانل میانی	$F_{bu} = \frac{2\sigma_{0f}}{d} \cdot Ab$
حداقل سطح مقطع سخت‌کننده‌های طرفین پانل میانی	$A \geq \frac{\sigma_{0w} \cdot td}{4\sigma_{0f}}$
حداقل نسبت ارتفاع به عرض پانل میانی برای داشتن رفتار برشی	$\frac{d}{b} < 6\frac{\sigma_{0w}}{\sigma_{0f}}$

جدول ٤ روابط ارائه شده به منظور تعیین کمیت‌های A و d/b در حالت استفاده از پانل میانی بدون تقویت (با فرض یکسان بودن نوع فولاد ورق و سخت‌کننده‌های طرفین آن)

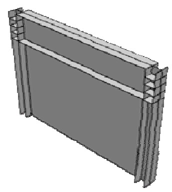
(تعریف)	(رابطه)
فرض اصلی در مورد پانل میانی نازک	$\tau_{cr} = 0$
نیروی برشی نهایی در ورق پانل میانی	$F_{su} = 0.5\sigma_0 \cdot bt$
نیروی جانبی نهایی در تراز فوقانی پانل میانی	$F_{bu} = \frac{2\sigma_0}{d} \cdot Ab$
حداقل سطح مقطع سخت‌کننده‌های طرفین پانل میانی	$A \geq \frac{td}{4}$
حداقل نسبت ارتفاع به عرض پانل میانی برای داشتن رفتار برشی	$\frac{d}{b} < 6$

فرضیات کلی مدل‌سازی عددی

به منظور مطالعه‌ی عددی عملکرد پانل میانی در پانل‌های برشی فولادی در این بخش، از نرم‌افزار المان محدود (ABAQUS (Version 6.7-1 استفاده شده است. در مدل‌سازی نمونه‌های تقویت‌شده و بدون تقویت انتخاب‌شده برای صحت‌سنجی نتایج که به ترتیب در اشکال (۳ و ۲) نشان داده شده‌اند، ورق فولادی، تیر فوقانی و ستون‌های احاطه‌کننده‌ی ورق با المان SHELL مدل شده‌اند. در جدول (۵) ابعاد ورق و سخت‌کننده‌ها، در جدول (٦) مشخصات مکانیکی انواع فولاد به کار رفته و در جدول (۷) ابعاد مقاطع تیر و ستون‌ها در نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌ها ارائه شده است. سخت‌کننده‌ها در مدل تقویت‌شده مانند نمونه‌ی آزمایشگاهی به صورت یک‌طرفه به عرض ٦٠ میلی‌متر و ضخامت ٤ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. انتخاب ابعاد سخت‌کننده‌ها به گونه‌ای انجام شده است که بر اساس معیار طراحی موجود [21]، کمانش ورق به جای کمانش کلی، به صورت کمانش موضعی در زیر صفحات باشد. سخت‌کننده‌ها به شکل ورق‌های مستطیلی می‌باشند. اتصال سخت‌کننده‌ها به ورق، اتصال تیر به ستون‌ها و اتصال ورق و سخت‌کننده‌ها به المان‌های قاب، همه از نوع اتصالات ممان‌گیر هستند. در محل اتصال ورق و سخت‌کننده‌های قائم به تراز پایه‌ی کلیه‌ی درجات آزادی مقید شده است. بارگذاری مدل‌ها از نوع مونوتونیک با اعمال تغییر مکان به مقطع ستون‌ها بوده و برای جلوگیری از ناپایداری عمود بر صفحه‌ی پانل، دو نقطه در تراز بالای مدل به صورت متقارن نسبت به خط عمودی گذرنده از مرکز سطح ورق در برابر تغییر مکان خارج از صفحه بسته شده‌اند. مش بندی اعضا با المان S4R انجام شده است که نوعی المان صفحه‌ای چهار گرهی با قابلیت انحنای دو طرفه می‌باشد به صورت نازک یا ضخیم قابل کاربرد است.



شکل ۲ مدل نمونه تقویت‌شده



شکل ۳ مدل نمونه بدون تقویت

جدول ۵ ابعاد ورق و سخت‌کننده‌ها در نمونه‌های مورد آزمایش

ضخامت (mm)	ارتفاع (mm)	عرض (mm)	المان
2	960	1410	ورق فولادی
3	140	90	سخت‌کننده‌های جان ستون
4	960	60	سخت‌کننده‌های عمودی
4	1410	60	سخت‌کننده‌های افقی

جدول ٦ مشخصات مکانیکی قطعات نمونه‌های مورد آزمایش

تنش نهایی (MPa)	تنش جاری شدن (Mpa)	نوع فولاد	المان
544	414.9	ST-52	ستون
544	414.9	ST-52	تیر
288.7	192.4	ST-14	ورق
370	240	ST-37	سخت‌کننده‌های اصلی

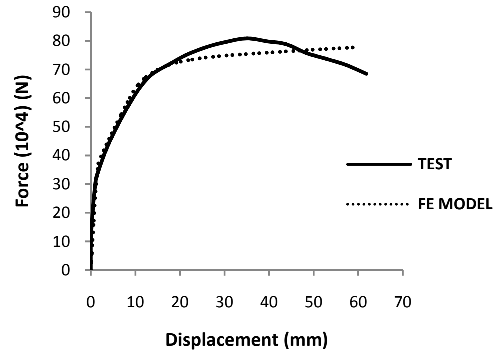
جدول ۷ ابعاد مقطع تیرها و ستون‌های نمونه‌های مورد آزمایش

ضخامت جان (mm)	ارتفاع جان (mm)	ضخامت بال (mm)	عرض بال (mm)	المان
20	60	15	140	ستون
20	250	20	140	تیر

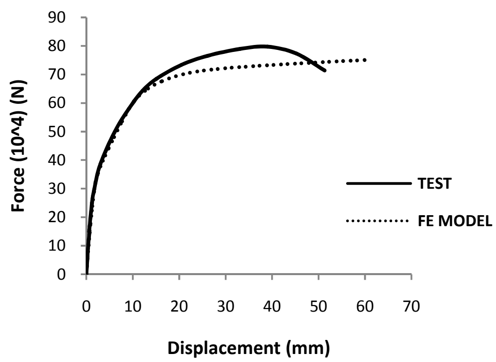
مدل‌سازی و معرفی مشخصات نمونه‌ها

در همه‌ی مدل‌های مورد مطالعه در این تحقیق، با هدف صحت‌سنجی روابط تئوریک به دست آمده در بخش‌های پیشین، عرض ورق برابر با ١٤١٠ میلی‌متر و ارتفاع آن برابر با ٩٦٠ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. ارتفاع و عرض بازشوها نیز به ترتیب برابر با ٤٥٠ میلی‌متر و ٢٥٠ میلی‌متر بوده و وضعیت استقرار سخت‌کننده‌ها در همه‌ی نمونه‌ها، مطابق با شکل (٦) انتخاب شده است. به دلیل ثابت بودن ارتفاع بازشوها (ارتفاع پانل میانی)، تغییر نسبت ارتفاع به عرض پانل، با تغییر فاصله‌ی بین بازشوها ایجاد شده است. در همه‌ی نمونه‌ها، سخت‌کننده‌های طرفین پانل میانی به صورت دو طرفه، با ارتفاع ٤٥٠ میلی‌متر، عرض ٢٦/٤ میلی‌متر و ضخامت ٢/٥ میلی‌متر مدل شده‌اند. سطح مقطع انتخاب‌شده برای سخت‌کننده‌های دوگانه‌ی طرفین پانل، کمی بیش از مقدار به دست آمده بر اساس روابط تعیین‌شده در بخش‌های پیشین می‌باشد. سخت‌کننده‌های روی ورق پانل اصلی، به صورت دو طرفه با عرض ١٤٠ میلی‌متر و ضخامت ٤ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. علت انتخاب مقاطعی با ممان اینرسی بالا برای سخت‌کننده‌های افقی و عمودی مذکور، جلوگیری از کمانش کلی و تبدیل وضعیت کمانشی به کمانش موضعی در زیر صفحات بوده است.[21] در نمونه‌های تقویت‌شده‌ی دارای دو بازشو، پانل میانی و سایر زیر صفحات به صورت آزاد در برابر تغییر شکل کمانشی بررسی شده‌اند. در شکل (٧) تعریف پارامتری ابعاد در مدل‌های با سخت‌کننده، نشان داده شده است.

در نام‌گذاری مدل‌های مورد بررسی به صورت SSWOU-1، SSWOU-2 تا SSWOU-14 مقادیر انتخاب شده برای نسبت (d_1/b_1) به ترتیب برابر با ٠/٧، ١، ١/٥، ٢/٠٨، ٢/٢، ٢/٥، ٢/٧٨، ٣، ٣/٥، ٣/٨، ٤/٢، ٦، ٧ و ٩ می‌باشند. حداقل نسبت ارتفاع به عرض پانل میانی (d_1/b_1)، بر اساس شرط بیشتر بودن تغییر مکان برشی نسبت به تغییر مکان خمشی در تراز



شکل ٤ مقایسه‌ی منحنی‌های مربوط به صحت‌سنجی نتایج در مورد مدل فاقد بازشو و با سخت‌کننده

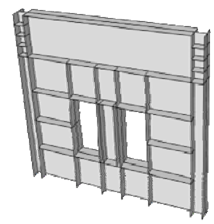


شکل ٥ مقایسه منحنی‌های مربوط به صحت‌سنجی نتایج در مورد مدل فاقد بازشو و بدون سخت‌کننده

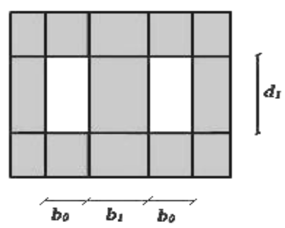
صحت سنجی نتایج

ملاک تعیین صحت نتایج مدل‌سازی، انطباق قابل قبول نمودارهای مربوط به تغییرات نیروی برشی در برابر تغییر مکان جانبی حاصل از آزمایش با منحنی‌های متناظر حاصل از مطالعه عددی، در نظر گرفته شده است. در اشکال (٥و٤)، به ترتیب مقایسه منحنی‌های بار- تغییر مکان حاصل از مدل‌سازی عددی و منحنی‌های متناظر آزمایشگاهی در مورد نمونه تقویت شده و بدون تقویت نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، منحنی‌های به دست آمده از نتایج آزمایش‌ها و مدل‌سازی، دارای انطباق قابل قبولی بر یکدیگر می‌باشند.

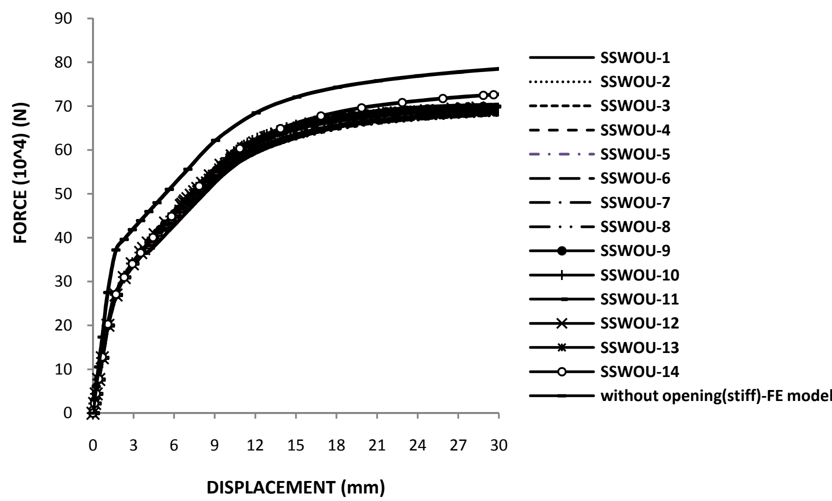
فوقانی بازشوها در پانل بین دو بازشو تعیین شده است. در شکل (۸) نمودار تغییـرات نیـروی برشـی در برابـر تغییر مکان جانبی در تراز فوقانی پانل اصلی برای تمام نمونه‌ها مقایسه شده است. در شکل‌هـای (۱۰ و ۹) دو مورد از نمونه‌ها، به ترتیب با نسبت (d_1/b_1) برابـر بـا ۰/۷ و ۹ پس از بارگذاری نشان داده شده است.



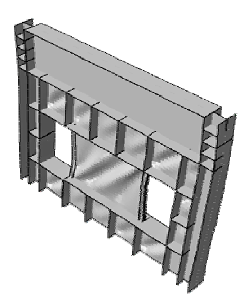
شکل ٦ وضعیت استقرار سخت‌کننده‌ها روی ورق



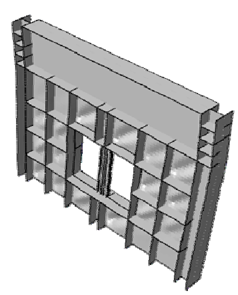
شکل ۷ تعریف ابعاد در نمونه‌های مورد مطالعه



شکل ۸ منحنی‌های بار- تغییر مکان برشی نمونه‌ها



شکل ۹ نمونه SSWOU-1 در حالت تغییر شکل یافته



شکل ۱۰ نمونه SSWOU-14 در حالت تغییر شکل یافته

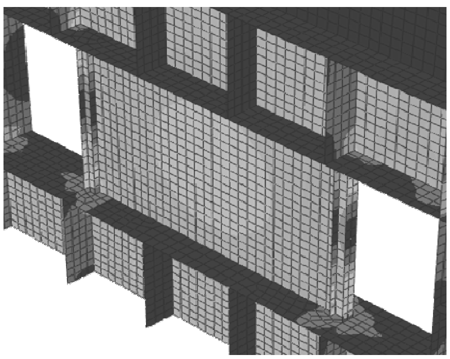
مقایسه‌ی نتایج مربوط به سختی و مقاومت برشی نمونه‌ها

با مشاهده‌ی شکل (۸) مشخص می‌شود، سختی برشی و مقاومت برشی نهایی همه پانل‌های بازشودار مورد بررسی تقریباً برابرند. به عبارت دیگر تغییر نسبت ارتفاع به عرض پانل نازک بین بازشوها، بر سختی و مقاومت برشی پانل تقویت‌شده‌ی اصلی بی‌تأثیر است؛ زیرا بر اساس تئوری اندر کنش ورق- قاب(PFI) [15و ۱۳] سختی و مقاومت برشی دیوارهای برشی فولادی تقویت‌شده‌ی بازشودار، تنها تابع عرض بازشوها و ضخامت ورق می‌باشد که هر دو پارامتر مذکور، در نمونه‌های مورد مطالعه ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

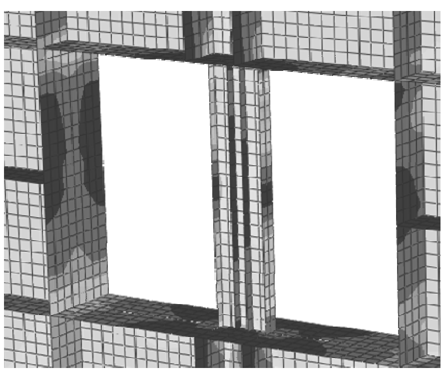
مقایسه‌ی نتایج مربوط به جاری شدن المان‌های پانل میانی

برای مقایسه‌ی ترتیب لحظه‌ی آغاز جاری شدن ورق پانل بین بازشوها و سخت‌کننده‌های طرفین پانل مذکور، ابتدا لازم است بر اساس قضاوت مهندسی، معیاری به منظور تعیین لحظه‌ی آغاز جاری شدن ورق و سخت‌کننده‌ها معرفی شود.

با توجه به این‌که در نمونه‌های دارای پانل میانی نازک، جاری شدن ورق از مرکز سطح آن آغاز شده و به سرعت به سمت لبه‌های ورق پیش می‌رود، لذا لحظه‌ی رسیدن نصف تا دو سوم سطح ورق به تنش حد جاری شدن آن در برش به عنوان زمان آغاز جاری شدن ورق انتخاب شده است. در مورد سخت‌کننده‌های طرفین پانل، جاری شدن در اثر خمش، از قسمت‌های انتهایی سخت‌کننده‌ها آغاز شده و به تدریج به سمت وسط سخت‌کننده‌ها پیشروی می‌کند. بنابراین، زمان رسیدن المان‌های انتهایی سخت‌کننده‌ها به تنش حد جاری شدن در خمش، به عنوان لحظه‌ی زمانی آغاز جاری شدن سخت‌کننده‌ها انتخاب شده است. در نمونه‌های مورد مطالعه، تنش حد جاری شدن فولاد ورق و سخت‌کننده‌ها به ترتیب برابر با ۱۹۲/٤ مگا پاسکال و ٤١٤/٩ مگا پاسکال می‌باشد. در اشکال (۱۲و۱۱) نحوه‌ی توزیع تنش‌های فون میسز در لحظه آغاز جاری شدن ورق در نمونه SSWOU-1 و سخت‌کننده‌ها در نمونه SSWOU-14، نشان داده شده است.



شکل ۱۱ نحوه‌ی توزیع تنش‌های فون میسز در نمونه‌ی SSWOU-1 در زمان آغاز جاری شدن ورق



شکل ۱۲ نحوه‌ی توزیع تنش‌های فون میسز در نمونه‌ی SSWOU-14 در زمان آغاز جاری شدن سخت‌کننده‌های طرفین پانل میانی

با این تعاریف، در نمونه‌هایی که جاری شدن نصف تا دو سوم سطح ورق پانل میانی، پیش از جاری شدن المان‌های انتهایی سخت‌کننده‌های دوگانه‌ی

طرفین آن رخ دهد، عملکرد پانل میانی، برشی ارزیابی می‌گردد و در نمونه‌هایی که در آن‌ها جاری شدن المان‌های انتهایی سخت‌کننده‌های دوگانه‌ی طرفین پانل، قبل از جاری شدن نصف تا دو سوم سطح ورق به وقوع بپیوندد، رفتار پانل میانی به صورت خمشی تعیین می‌شود. اگر مساحت سطحی کم‌تر از نصف تا دو سوم سطح کل ورق، به عنوان معیار، برای تعیین لحظه‌ی آغاز جاری شدن ورق در نظر گرفته شود، اختلاف لحظه‌ی آغاز جاری شدن ورق جان و سخت‌کننده‌های طرفین پانل بین بازشوها بیشتر می‌گردد. در چنین شرایطی پانل میانی به سمت رفتار خمشی خالص یا برشی خالص پیش می‌رود. در صورتی که اگر جاری شدن سطحی بیشتر از نصف تا دو سوم سطح کل ورق به عنوان معیار در نظر گرفته شود، اختلاف لحظه‌ی آغاز جاری شدن ورق جان و سخت‌کننده‌ها، کم‌تر می‌شود و پانل میانی رفتاری به صورت رفتار برشی و خمشی توأم نشان می‌دهد.

بر اساس تئوری PFI، پس از کمانش ورق و شکل‌گیری میدان پس کمانش، تنش‌های ورق فولادی با لحاظ نمودن تنش‌های بحرانی از روابط (۲۸) تا (۳۰) محاسبه می‌گردند:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{ty}\sin^2\theta \qquad (۲۸)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_{ty}\cos^2\theta \qquad (۲۹)$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \tau_{cr} + \frac{1}{2}\sigma_{ty}\cdot\sin2\theta \qquad (۳۰)$$

در روابط فوق، σ_{xx} و σ_{yy} مؤلفه‌های تنش قائم و σ_{xy} مؤلفه‌ی تنش برشی حاصل از میدان کششی ورق می‌باشند. بر اساس معیار جاری شدن فون میسز، در زمان جاری شدن ورق فولادی رابطه‌ی (۳۱) برقرار است:

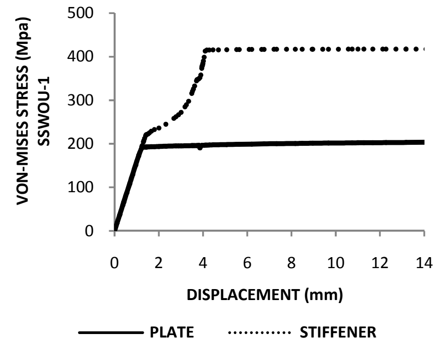
$$\begin{aligned}&(\sigma_{xx}-\sigma_{yy})^2+(\sigma_{yy}-\sigma_{zz})^2\\&+(\sigma_{zz}-\sigma_{xx})^2+6\sigma_{xy}^2+6\sigma_{yz}^2\\&+6\sigma_{zx}^2-2\sigma_0^2=0\end{aligned} \qquad (۳۱)$$

با توجه به این‌که $\sigma_{zz}=\sigma_{yz}=\sigma_{zx}=0$ می‌باشد، می‌توان نوشت:

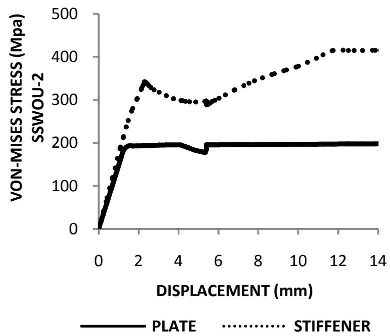
$$3\tau_{cr}^2+3\tau_{cr}\sigma_{ty}\sin2\theta+\sigma_{ty}^2-\sigma_0^2=0 \qquad (۳۲)$$

لذا با در اختیار داشتن مقدار تنش حد جاری شدن ورق فولادی و یا فولاد در آزمایش کشش تک محوری σ_0 و تنش برشی بحرانی τ_{cr} در ورق فولادی می‌توان تنش σ_{ty} را با توجه به رابطه‌ی (۳۲) محاسبه نمود. سپس محاسبه‌ی تنش‌های قائم σ_{xx} و σ_{yy} و نیز محاسبه تنش برشی $\sigma_{xy}=\sigma_{yx}$ به ترتیب از روابط (۳۰-۲۸) امکان پذیر خواهد بود.

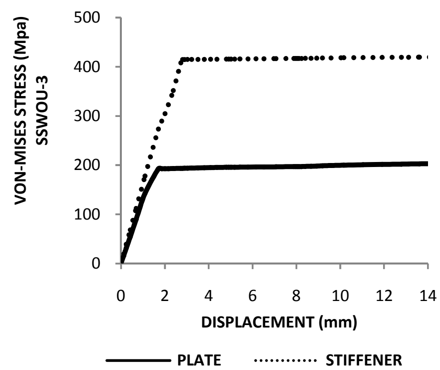
در شکل‌های (۲۶-۱۳)، وضعیت تنش‌ها در ورق پانل میانی و سخت‌کننده‌های اطراف آن در تغییر مکان‌های مختلف برای تعیین آغاز جاری‌شدگی در هر کدام از آن‌ها آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد با افزایش (d_1/b_1) به تدریج شروع جاری‌شدگی از ورق به سخت‌کننده‌های اطراف پانل میانی منتقل می‌شود. این موضوع در شکل (۲۷) به وضوح قابل رؤیت می‌باشد. به طوری که از روی شکل مذکور می‌توان مشاهده نمود که تا حدود $(d_1/b_1) < 4.0$، ابتدا ورق پانل میانی جاری می‌شود. به عبارت دیگر می‌توان بیان نمود که در این محدوده پانل میانی در برش عمل می‌نماید و فراتر از این حد به تدریج عملکرد آن به سمت خمشی میل می‌کند.



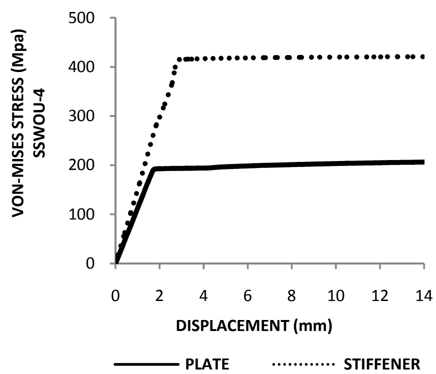
شکل ۱۳ مقایسه‌ی تغییرات تنش جاری شدن فون میسز ورق پـانل میانی و سخت‌کننده‌های طرفیـن آن بر حسب تغییر مکان نمونه SSWOU-1 با $d_1/b_1= 0.7$



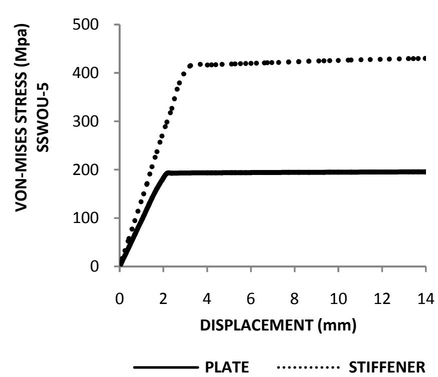
شکل ۱٤ مقایسه‌ی تغییرات تنش جاری شدن فون میسز ورق پـانل میانی و سخت‌کننده‌های طرفیـن آن بر حسب تغییر مکان نمونه SSWOU-2 با $d_1/b_1=1$



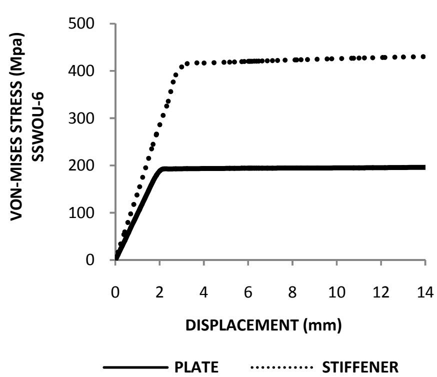
شکل ۱۵ مقایسه‌ی تغییرات تنش جاری شدن فون میسز ورق پـانل میانی و سخت‌کننده‌های طرفیـن آن بر حسب تغییر مکان نمونه SSWOU-3 با $d_1/b_1=1.5$



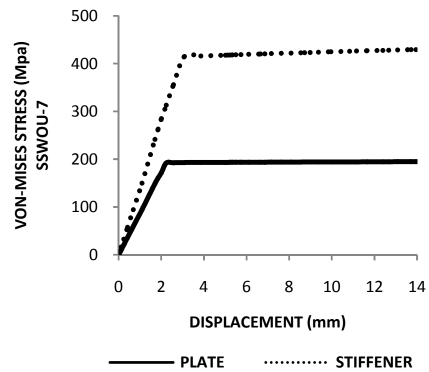
شکل ١٦ مقایسه‌ی تغییرات تنش جاری شدن فون میسز ورق پـانل میانی و سخت‌کننده‌های طرفیـن آن بر حسب تغییر مکان نمونه SSWOU-4 با $d_1/b_1= 2.08$



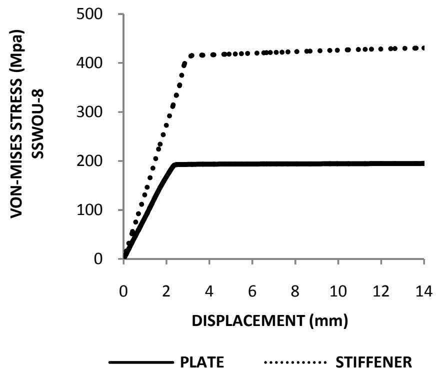
شکل ۱۷ مقایسه‌ی تغییرات تنش جاری شدن فون میسز ورق پـانل میانی و سخت‌کننده‌های طرفیـن آن بر حسب تغییر مکان نمونه SSWOU-5 با $d_1/b_1= 2.2$



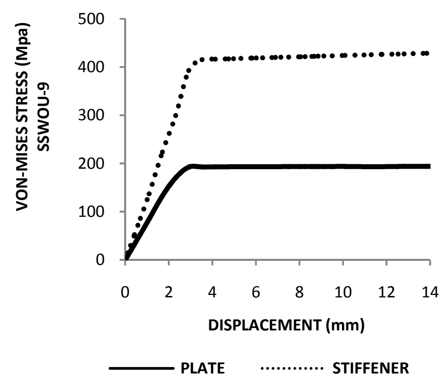
شکل ۱۸ مقایسه‌ی تغییرات تنش جاری شدن فون میسز ورق پـانل میانی و سخت‌کننده‌های طرفیـن آن بر حسب تغییر مکان نمونه SSWOU-6 با $d_1/b_1= 2.5$



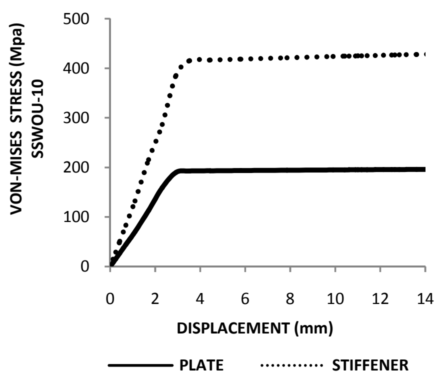
شکل ۱۹ مقایسه‌ی تغییرات تنش جاری شدن فون میسز ورق پـانل میانی و سخت‌کننده‌های طرفیـن آن بر حسب تغییر مکان نمونه SSWOU-7 با $d_1/b_1= 2.78$



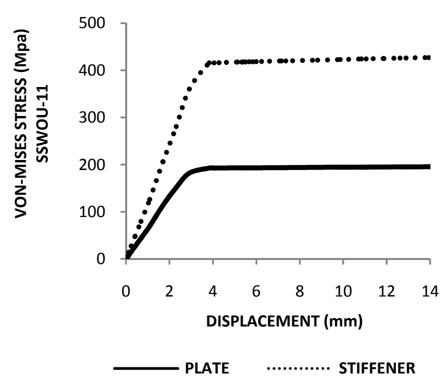
شکل ۲۰مقایسه‌ی تغییرات تنش جاری شدن فون میسز ورق پـانل میانی و سخت‌کننده‌های طرفیـن آن بر حسب تغییر مکان نمونه SSWOU-8 با $d_1/b_1= 3$



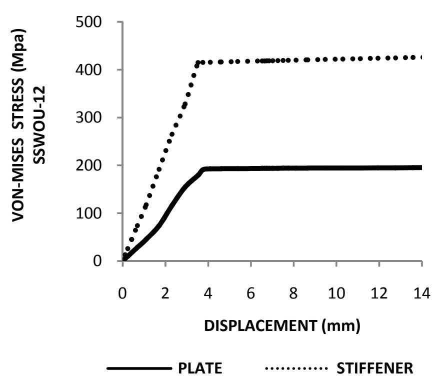
شکل ۲۱ مقایسه‌ی تغییرات تنش جاری شدن فون میسز ورق پـانل میانی و سخت‌کننده‌های طرفیـن آن بر حسب تغییر مکان نمونه SSWOU-9 با $d_1/b_1= 3.5$



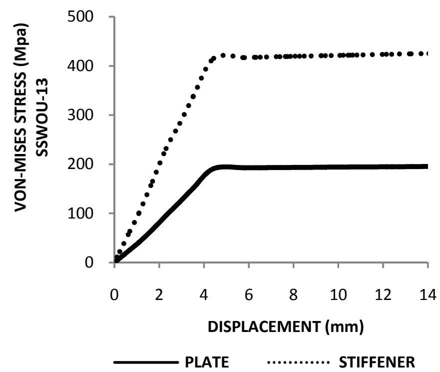
شکل ۲۲ مقایسه‌ی تغییرات تنش جاری شدن فون میسز ورق پـانل میانی و سخت‌کننده‌های طرفیـن آن بر حسب تغییر مکان نمونه SSWOU-10 با $d_1/b_1= 3.8$



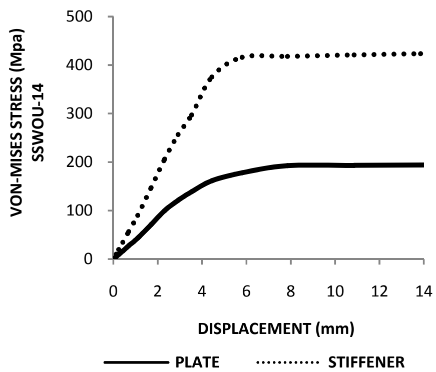
شکل ۲۳ مقایسه‌ی تغییرات تنش جاری شدن فون میسز ورق پـانل میانی و سخت‌کننده‌های طرفیـن آن بر حسب تغییر مکان نمونه SSWOU-11 با $d_1/b_1= 4.2$



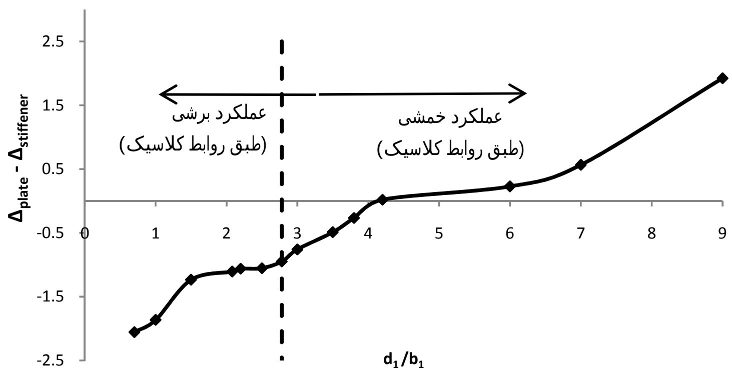
شکل ٢٤ مقایسه‌ی تغییرات تنش جاری شدن فون میسز ورق پـانل میانی و سخت‌کننده‌های طرفیـن آن بر حسب تغییر مکان نمونه SSWOU-12 با $d_1/b_1= 6$



شکل ۲۵ مقایسه‌ی تغییرات تنش جاری شدن فون میسز ورق پـانل میانی و سخت‌کننده‌های طرفیـن آن بر حسب تغییر مکان نمونه SSWOU-13 با $d_1/b_1= 7$



شکل ۲۶ مقایسه‌ی تغییرات تنش جاری شدن فون میسز ورق پـانل میانی و سخت‌کننده‌های طرفیـن آن بر حسب تغییر مکان نمونه SSWOU-14 با $d_1/b_1= 9$



شکل ۲۷ مقایسه‌ی مقدار اختلاف تغییر مکان آغاز جاری شدن ورق پانل میانی و سخت‌کننده‌های طرفین آن بر حسب نسبت d_1/b_1

مقایسه‌ی نتایج روش عددی با روش تئوری کلاسیک

همان طور که در شکل (۲۷) نشان داده شده است، در صورت انتخاب فولاد به ترتیب با تنش جاری شدن ۱۹۲/٤ و ٤١٤/٩ مگا پاسکال برای ورق پانل میانی و سخت‌کننده‌های اطراف آن، بر اساس روش تئوری کلاسیک با انتخاب نسبت ارتفاع به عرض پانل میانی کم‌تر از ۲/۸، $\left(\frac{d_1}{b_1} < 2.1\right)$ پانل مذکور به صورت برشی عمل می‌نماید. این در حالی است که نتایج روش عددی حد مذکور را حدوداً برابر با ٤/۰ به دست می‌دهد. از آن‌جا که برای تعیین دقیق‌تر این حد نیاز به انجام آزمایش‌های متعدد می‌باشد، لذا می‌توان تا زمان انجام آن‌ها، از حد به دست آمده در روش تئوری کلاسیک، که در جهت اطمینان بیشتر می‌باشد، استفاده نمود.

نتایج

در این تحقیق، پانل نازک بین دو بازشو در دیوارهای برشی فولادی تقویت‌شده به لحاظ ارائه‌ی عملکرد برشی یا خمشی مورد مطالعه قرار گرفت. به این منظور، به کمک روش کلاسیک، روابط حاکم بر نوع عملکرد پانل مذکور تعیین گردید. سپس به کمک

روش عددی که با دو آزمایش انجام شده کالیبره شد، صحت روابط به دست آمده مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید:

الف) در صورت کم‌تر بودن نسبت ارتفاع به عرض پانل میانی $\left(\frac{d_1}{b_1}\right)$ از حدود ٤/٠ ، آغاز جاری شدگی ابتدا در ورق اتفاق می‌افتد، لذا در این حالت رفتار پانل میانی به صورت برشی ارزیابی می‌گردد.

ب) به شرط بیشتر بودن نسبت ارتفاع به عرض پانل میانی $\left(\frac{d_1}{b_1}\right)$ از حدود ٤/٠، نتایج نشان می‌دهد که آغاز جاری شدگی به جای ورق، ابتدا در سخت‌کننده‌ها واقع می‌شود، که در این حالت رفتار پانل میانی به صورت خمشی ارزیابی می‌شود.

در صورت انتخاب فولاد با تنش جاری شدن ۱۹۲/٤ مگا پاسکال برای ورق نازک پانل میانی و نیز فولاد دارای تنش جاری شدن برابر با ٤١٤/٩ مگا پاسکال برای سخت‌کننده‌های طرفین پانل مذکور،

ج) بر اساس روش تئوری، با انتخاب نسبت ارتفاع به عرض پانل میانی مساوی با مقداری کم‌تر از ۲/۸، پانل به صورت برشی رفتار می‌کند. در حالی که با توجه به شکل (۲۷) روش عددی حد ٤/٠ را به عنوان مرز تفکیک کننده‌ی رفتار برشی و خمشی به‌دست می‌دهد.

با وجود صحت‌سنجی اولیه‌ی نتایج حاصل از مطالعه‌ی عددی با دو آزمایش، برای استناد به آن‌ها لازم است مطالعات آزمایشگاهی بیشتری همراه با بررسی نقش قاب دربرگیرنده ورق انجام شود و نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی به دقت مورد مطالعه قرار داده شود.

فهرست علائم

A	مساحت مقطع المان تیر با مقطع I شکل، سطح مقطع سخت‌کننده‌های طرفین پانل میانی در پانل‌های برشی دارای دو بازشو
A_w	مساحت وجه تحت اثر برش ورق درپانل میانی
b	دهانه دیوار برشی فولادی و یا پانل برشی، دهانه پانل میانی در پانل‌های برشی دارای دو بازشو
d	ارتفاع طبقه در دیوار برشی فولادی و یا پانل برشی، ارتفاع پانل میانی در پانل‌های برشی فولادی دارای دو بازشو
E	ضریب ارتجاعی
F_{bu}	نیروی جانبی ناشی از لنگر خمشی نهایی (با فرض الاستیک- کاملاً پلاستیک بودن دیاگرام تنش- کرنش فولاد) در تراز فوقانی پانل میانی
F_{su}	نیروی برشی نهایی (با فرض الاستیک- کاملاً پلاستیک بودن دیاگرام تنش- کرنش فولاد)
F_{wu}	نیروی برشی نهایی ورق فولادی
G	ضریب ارتجاعی برشی
I	ممان اینرسی المان تیر با مقطع I شکل
K_b	سختی خمشی المان تیر با مقطع I شکل، سختی خمشی پانل میانی
K_s	سختی برشی المان تیر با مقطع I شکل، سختی برشی پانل میانی
K	ثابت برش مقطع
μ	ضریب پواسون
$M(x)$	لنگر خمشی در مقطع المان به ازای اعمال نیروی جانبی F
$m(x)$	لنگر خمشی در مقطع المان به ازای اعمال نیروی جانبی واحد
M_B	ممان خمشی در تراز پایین پانل میانی
M_T	ممان خمشی در تراز بالای پانل میانی
t	ضخامت ورق فولادی
θ	زاویه میدان کششی به وجود آمده در

	ورق فولادی
U_{we}	تغییر مکان برشی حد الاستیک ورق فولادی
$V(x)$	نیروی برشی در مقطع المان به ازای اعمال نیروی جانبی F
$v(x)$	نیروی برشی در مقطع المان به ازای اعمال نیروی جانبی واحد
x	ارتفاع مقطع مورد نظر برای محاسبه تلاش‌های داخلی از تراز پایه
σ_0	حد جاری شدن ورق فولادی و یا فولاد در آزمایش تک محوری کششی
σ_{0f}	تنش جاری شدن فولاد بال‌ها (سخت‌کننده‌های طرفین پانل میانی)
σ_{0w}	تنش جاری شدن فولاد جان (ورق پانل میانی)
σ_{ty}	تنش حد جاری شدن میدان کششی به وجود آمده در ورق فولادی
σ_{xx}	مؤلفه تنش قائم حاصل از میدان کششی ورق، که موازی محور x بوده و بر وجه با بردار نرمال موازی محور x اثر می‌کند.
σ_{yy}	مؤلفه تنش قائم حاصل از میدان کششی ورق، که موازی محور y بوده و بر وجه با بردار نرمال موازی محور y اثر می‌کند.
σ_{xy}	مؤلفه تنش قائم حاصل از میدان کششی ورق، که موازی محور y بوده و بر وجه با بردار نرمال موازی محور x اثر می‌کند.
σ_{yx}	مؤلفه تنش قائم حاصل از میدان کششی ورق، که موازی محور x بوده و بر وجه با بردار نرمال موازی محور y اثر می‌کند.
Δ	تغییر مکان تراز فوقانی پانل میانی
Δ_{bu}	تغییر مکان خمشی حد الاستیک پانل میانی
Δ_{su}	تغییر مکان برشی حد الاستیک پانل میانی
τ_{cr}	تنش برشی بحرانی (حد کمانش) ورق فولادی
τ_{wy}	تنش حد جاری شدن ورق فولادی در برش

مراجع

1. Astaneh Asl, A.; Zhao, Q., "Seismic Behavior and Design of Steel Shear Walls", Steel Tips, Structural Steel Educational Council, Technical Information and Product Service, (2001).
2. Astaneh Asl, A., "Seismic Behavior and Design of Composite Steel Plate Shear Walls", Steel Tips, Structural Steel Educational Council, Technical Information and Product Service, (2002).
3. Astaneh Asl, A., Zhao, Q., "Cyclic Behavior of Steel Shear Wall Systems", *Proceedings*, *Annual Stability Conference, Structural Stability Research Council, Seattle*, (2002).
4. Driver, R.G., Kulak, G.L., Kennedy, D.J.L., Elwi, A.E., "Seismic Behavior of Steel Plate Shear Walls", *University of Alberta, Department of Civil and Environmental Engineering*, *Structural Engineering, Report* No. 215, (1997).

5. Thorburn, L.J., Kulak, G.L., Montgomery, C.J., "Analysis of Steel Plate Shear Walls", *University of Alberta, Department of Civil and Environmental Engineering, Structural Engineering*, Report No. 107, (1983).

6. Driver, R.G., Kulak, G.L., Elwi, A.E., Kennedy, D.J., "FE and Simplified Models of Steel Plate Shear Wall", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, pp. 121-130, (1998).

7. Sabelli, R., Bruneau, M., "Steel Plate Shear Walls", Steel Design Guide 20, American Institute of Steel Construction, (2006).

8. Berman, J., Bruneau, M., "Plastic Analysis and Design of Steel Plate Shear Walls ", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, pp. 1448-1456, (2003).

9. Bruneau, M., Bhagwagar, T., "Seismic Retrofit of Flexible Steel Frames Using Thin Infill Panels", *Journal of Engineering Structures 24, Elsevier*, pp. 443-453, (2002).

10. Vian, D., Bruneau, M., "Testing of Special LYS Steel Plate Shear Walls", *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper* No. 978, Vancouver, British Columbia, Canada, (2004).

11. Choi, I., Park, H., "Cyclic Test For Framed Steel Plate Walls With Various Infill Plate Details", *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing*, China, (2008).

12. Choi, I.R., Park, H.G., "Ductility and Energy Dissipation Capacity of Shear-Dominated Steel Plate Shear Walls", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, pp.1495-1507, (2008).

۱۳. صبوری- قمی، سعید، «سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی، مقدمه‌ای بر دیوارهای برشی فولادی»، انتشارات انگیزه، (۱۳۸۰).

١٤. صبوری- قمی، سعید، «سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی، طرح اندیشه استفاده از فولاد نرم»، انتشارات انگیزه، (۱۳۸۳).

15. Sabouri-Ghomi, S., Ventura, C.E., Kharrazi, M.H.K., "Shear Analysis and Design of Ductile Steel Plate Walls", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 131(6), pp. 878-889, (2005).

16. Sabouri-Ghomi, S., "Discussion of Plastic Analysis and Design of Steel Plate Shear Walls", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 131(4), pp. 695-697, (2005).

17. Sabouri-Ghomi, S., Roberts, T.M., "Hysteretic Characteristics of Unstiffened Plate Shear Panels", *Journal of Thin-Walled Structures* 12, pp.145-162, (1991).

18. Sabouri-Ghomi, S., Roberts T.M., "Hysteretic Characteristics of Unstiffened Perforated Plate

Shear Panels", *Journal of Thin-Walled Structures* 14, pp.139-151, (1992).

۱۹. اخوان لیل آبادی، محمدرضا، طاحونی، شاپور، « تحلیـل سازه‌ها (روش کلاسیک و ماتریس)» ، انتشـارات جهـاد دانشـگاهی صنعتی امیر کبیر، (۱۳۸۱).

۲۰. صبوری- قمی، سعید، سجادی، رامین، «بررسی آزمایشگاهی ضریب رفتار و جذب انرژی دیوارهـای برشـی فـولادی شـکل پذیر با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده»، مجله‌ی علمـی- پژوهشـی سـازه و فـولاد، سـال چهـارم، شـماره ۳، ص ص ۱۳-۲۵، (۱۳۸۷).

21. Sabouri-Ghomi, S., Kharrazi, M.H.K., Mam-Azizi, S., Asad Sajadi, R., " Buckling Behavior Improvement of Steel Plate Shear Wall Systems", *Journal of the structural design of tall and special buildings*, Vol. 17, pp. 823-837, (2008).